

张杨,徐志胜,楚坤坤,等.基于模糊综合评判的终南山隧道防灾运营风险评估[J].灾害学,2021,36(3):170-173,234.[ZHANG Yang, XU Zhisheng, CHU Kunkun, et al. Research on Operation risk Assessment of Zhongnanshan Tunnel based on Fuzzy Comprehensive Evaluation method [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36 (3): 170 - 173, 234. doi: 10.3969/j. issn. 1000 - 811X. 2021. 03. 029.]

# 基于模糊综合评判的终南山隧道防灾运营风险评估<sup>\*</sup>

张 杨<sup>1</sup>, 徐志胜<sup>2</sup>, 楚坤坤<sup>2</sup>, 赵家明<sup>2</sup>

(1. 陕西交通控股集团有限公司西镇分公司, 陕西 西安 710000;

2. 中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**针对隧道流量高、里程长及埋深大的特点,将隧道、路网、人为、车辆、环境及管理因素作为安全运营的风险评估指标,提出多层次分段结构模型。通过邀请专家,定制打分表格,选定各致险因素之间的相对权重关系,采用模糊综合评判理论对终南山隧道的运营风险进行了多级模糊综合评判,分析结果为终南山隧道确定合理的安全运营风险防控措施提供了理论依据,对促进我国再役特长公路隧道运营安全管理起到推广和建议作用。

**关键词:**终南山隧道;运营风险;模糊综合评判;风险预测

**中图分类号:**X43; X915.5; U459.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-811X(2021)03-0170-05

doi: 10.3969/j. issn. 1000 - 811X. 2021. 03. 029

中国高速公路建设规模和通车里程的增加,隧道建设规模长大化,数量飞速增长,截止2020年末,中国公路隧道21 316处、21 999.3 km,其中特长隧道1 394处、6 235.5 km,长隧道5 541处、9 633.2 km<sup>[1]</sup>。随之而来的隧道运营安全问题越加突出。

已有一些学者对公路隧道安全运营进行了较为系统的研究。潘正中等<sup>[2]</sup>针对中国的高速公路隧道,形成了对隧道总体运营安全风险进行评估的科学方法和分级指标,提出了分区段运营安全分线评估标准;吴森阳等<sup>[3]</sup>采用数据统计、理论分析方法,基于成本-效益关系,针对隧道运营安全改善方案,构建了理论决策模型;郭延永等<sup>[4]</sup>针对交通运行环境的安全问题,构建了山区高速公路的理论分析方法及评价体系;陈红等<sup>[5]</sup>采用Delphi Method构建了评级体系,将AHP法和熵权法结合确定权重,可提高权重系数的精度。

目前,隧道运营安全风险评估还依托于相关行业标准及规范,但技术规范缺项较大,很难具体指导实际隧道运营管理。要从交通事故、公路设施和综合问题风险评估三个方面评价。诱发隧道事故因素通常具有一定的随机性、耦合性和不确定性,本文结合终南山隧道通车运营13年

来的实际运营情况,采用模糊综合评判法的方法,从管理养护、事故预防及应急处置等方面入手,对终南山隧道进行风险评估预测,为合理风险防控措施制定提供科学依据。

## 1 工程概况

本研究以秦岭终南山公路隧道为背景,工程安全等级为一级,全长18.02 km,双洞单向,双向4车道,最大埋深1 640 m。断面净宽10.5 m,限高5 m。隧道具有自主知识产权,中国里程碑式的特长公路隧道,行业的示范性、标志性工程。

目前,特长公路隧道管理经验不足,需多方论证,大胆探索,建立运营安全保障体系,从防灾救援、通风疏散、安全养护等方面进行部门设置和人员配置,高仿真演练,考虑最不利因素组合下的救援,基于“以人为本、黄金时间”的考虑,组建企业专职消防救援队,加强防灾救援,提高应战能力。目前运营压力也比较大,车流量已经从通车时候的1 200辆/昼夜,增加到目前22 000辆/昼夜,高峰期达到51 000辆/昼夜,隧道设计

\* 收稿日期:2020-11-16 修回日期:2021-03-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2017 YFB1201204)

第一作者简介:张杨(1986-),男,汉族,陕西榆林人,硕士,工程师,主要从事特长公路隧道防灾运营、应急救援、智能养护方面的研究。E-mail: 342285876@qq.com

车流量是2025年到达25 000辆/昼夜,2035年达到45 000辆/昼夜。

从多角度分析,包括大交通流量下的安全管理、应急救援、设备维护。通过数学计算、分配权值建立模型。采取科学合理措施,降低隧道运营风险。

## 2 模糊综合评判基本原理

模糊综合评判法<sup>[6]</sup>是一种综合性评价法。对工程中实际问题,采用隶属度理论,将评价指标由定性转化为定量。工程实际受到多种不同因素制约,可用模糊数学进行总体评判。考虑各致险因素影响,能较好处理模糊的、难以量化的问题。

### 2.1 指标因素集

根据模糊综合评价指标体系,建立的指标因素集为:

$$\mathbf{E} = (E_{11}, E_{12}, E_{13}, E_{21}, E_{22}, E_{23}, \dots, E_{62}, E_{63}) \quad (1)$$

### 2.2 建立评价集

确定四个等级指标评语,构设评语等级集合 $V$ 为 $(V_1, V_2, V_3, V_4)$ ,评语等级集合向量为 $\mathbf{V} = (4, 3, 2, 1)$ 。各等级标语如表1所示。

表1 各等级标语表示

等级	标语	风险
$V_1$	优	低风险
$V_2$	良	一般风险
$V_3$	中	较大风险
$V_4$	差	重大风险

### 2.3 构建各因素之间的评判矩阵

邀请行业内权威专家确定评价指标和评价集之间隶属度,对各指标进行评价和审查,并给予合理的评分,从而使结果更加客观准确。

如果对某一个评价指标 $E_{ij}$ 存在较多评语,其中 $V_1$ 评语为 $n_1$ 个, $V_2$ 评语为 $n_2$ 个, $V_3$ 评语为 $n_3$ 个, $V_4$ 评语为 $n_4$ 个,则评语集合 $V$ 的隶属向量为:

$$C_{ij} = \left( \frac{n_1}{n}, \frac{n_2}{n}, \frac{n_3}{n}, \frac{n_4}{n} \right) \quad (2)$$

采用公式计算获得各个评价指标的隶属向量,并将其进行组合,得到与各因素对应的评判矩阵,例如路网因素评判矩阵为 $\mathbf{C}_1 = (C_{11}, C_{12}, C_{13})^T$ 。

### 2.4 模糊综合评判

本文采用加权平均法构建模糊综合评价模型,先由指标层评判准则层,由各因素评判矩阵 $\mathbf{C}_i$ 与其对应的权重向量 $\mathbf{W}_{Ui}$ 进行矩阵计算,得评判向量 $\mathbf{B}_i$ 。

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{W}_{Ui} \times \mathbf{C}_i \quad (3)$$

然后将各评判向量 $\mathbf{B}_i$ 按行组合,得到准则层的单因素评判矩阵 $\mathbf{B} = (B_1, B_2 \dots, B_i)^T$ ,同样与对应的

准则层权重向量 $\mathbf{W}_U$ 进行矩阵计算,得评判向量 $\mathbf{C}$ 。

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}_U \times \mathbf{B} \quad (4)$$

最后与评语等级集向量 $\mathbf{V}$ 进行计算,即可得到最终的综合评分值。

$$v = \mathbf{C} \times \mathbf{V}^T \quad (5)$$

## 3 终南山隧道风险指标体系及权重研究

### 3.1 建立递阶层次结构

结合终南山隧道的运营环境,本文将指标体系结构分为三层,首先为目标层,即终南山隧道运营风险影响因素,用 $\mathbf{U}$ 表示;其次为准则层,包括路网、隧道、驾驶人、车辆、环境和管理等因素,这些因素可能会在一定程度上影响隧道正常运营,分别表示为 $E1, E2, E3, E4, E5, E6$ ;最后为指标层,即对准则因素产生直接影响的主要指标。其中,路网因素主要由以下三点组成,隧道交通量、大车比例和交通形式,分别表示为 $E11, E12, E13$ ;隧道因素主要包括以下五个指标,曲线半径、纵坡坡度、路面材料、隧道通风、隧道照明,分别表示为 $E21, E22, E23, E24, E25$ ;驾驶人因素主要由以下三点组成,驾驶技术、不安全行为、安全意识,分别表示为 $E31, E32, E33$ ;车辆因素主要有两点,即车速和车辆性能,分别表示为 $E41, E42$ ;环境因素主要分为内部环境、外部环境,分别表示为 $E51, E52$ ;管理因素则主要由以下三点组成,即交通管制水平、宣传教育和隧道养护,分别表示为 $E61, E62, E63$ ,综合以上提到的各层次影响因素,构建递阶层次结构(图1)。

### 3.2 构造判断矩阵

判断矩阵的构建是层次分析法<sup>[7-9]</sup>的基础,判断矩阵的构建过程如下:首先比较各层因素的相对重要性,然后用相关数字标度表示,从而实现重要程度的量化。本文采用改进后的指数标度法<sup>[9]</sup>,其公式为:

$$u = 1.316^b, (b=0, 1, 2, \dots, 8) \quad (6)$$

式中: $b$ 为标度,其具体含义如表2所示。

表2 指数标度 $b$ 表示

$b$	表示
0	两元素比较,同等重要
2	两元素比较,前者比后者略显重要
4	两元素比较,前者比后者较为重要
6	两元素比较,前者比后者一般重要
8	两元素比较,前者比后者极其重要
1, 3, 5, 7	介于上述相邻判断之间
负值	A与B重要性之比为 $b$ ,则B与A重要性之比为 $-b$

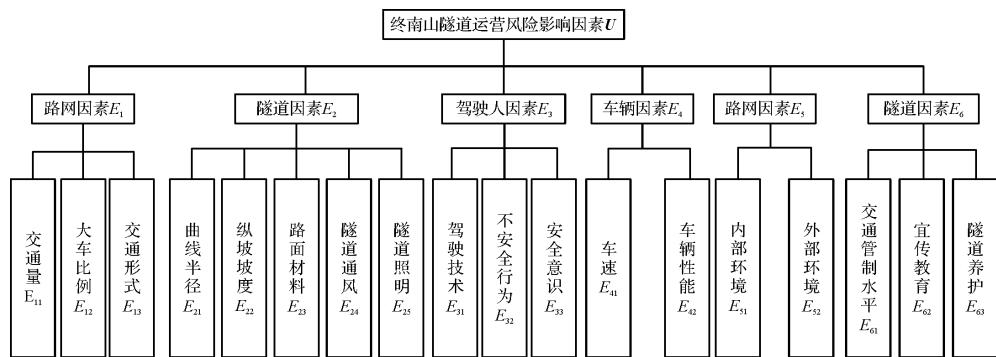


图 1 终南山隧道风险因素递阶层次结构

本文基于多位行业内具有权威的专家对相关因素重要性的评价, 得到准则层及指标层的判断矩阵, 如表 3 和表 4 所示, 同理可以构造出其它所有判断矩阵。

表 3 准则层的判断矩阵

$E$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$
$E_1$	1	$1.316^{-2}$	$1.316$	$1.316^3$	$1.316^3$	$1.316^3$
$E_2$	$1.316^2$	1	$1.316$	$1.316^4$	$1.316^5$	$1.316^5$
$E_3$	$1.316^{-1}$	$1.316^{-1}$	1	$1.316^2$	$1.316^3$	$1.316^4$
$E_4$	$1.316^{-3}$	$1.316^{-4}$	$1.316^{-2}$	1	$1.316^2$	$1.316^2$
$E_5$	$1.316^{-3}$	$1.316^{-5}$	$1.316^{-3}$	$1.316^{-2}$	1	$1.316^2$
$E_6$	$1.316^{-5}$	$1.316^{-5}$	$1.316^{-4}$	$1.316^{-2}$	$1.316^{-2}$	1

$\lambda_{\max} = 6.306$ ,  $CI = 0.061$ ,  $CR = 0.075$  满足一致性要求

表 4 指标层的判断矩阵

$E_1$	$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{13}$
$E_{11}$	1	$1.316$	$1.316^{-2}$
$E_{12}$	$1.316^{-1}$	1	$1.316^{-2}$
$E_{13}$	$1.316^2$	$1.316^2$	1

$\lambda_{\max} = 3.008$ ,  $CI = 0.004$ ,  $CR = 0.012$  满足一致性要求

### 3.3 计算单一准则下指标的相对权重

在得到各层次因素的判断矩阵后, 计算矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}$  及其对应的特征向量  $\mathbf{W} = (W_1, W_1, \dots, W_n)^T$ , 然后进行归一化处理, 得到权重向量  $\mathbf{w} = (w_1, w_1, \dots, w_n)^T$ , 即作为准则层和指标层因素的权重。本文利用 MATLAB 进行计算, 得到准则层权重和指标层  $\mathbf{U}_1$  权重向量如下:

$$\mathbf{W}_U = (0.220, 0.308, 0.192, 0.113, 0.106, 0.061); \quad (7)$$

$$\mathbf{W}_{U1} = (0.293, 0.244, 0.463)。 \quad (8)$$

### 3.4 一致性检验

由于评判人认识的局限性和多样性, 对某些因素的评判不够客观, 因此所得到的判断矩阵必须进行一致性检验, 以保证计算出的权重的合理性, 步骤如下。

计算一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}。 \quad (9)$$

式中:  $n$  为判断矩阵的阶数。

计算一致性比率:

$$CR = \frac{CI}{RI}。 \quad (10)$$

若一致性比率  $CR < 0.10$ , 则满足一致性要求。 $RI$  为随机一致性指数,  $RI$  取值见表 5 所示。

表 5 随机一致性指数 RI 取值

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8
$RI$	0	0	0.36	0.58	0.72	0.82	0.88	0.93

### 3.5 风险指标权重的确定

按上述步骤, 计算出所有指标权重系数, 最后得出高速公路特长隧道评价体系指标权重见表 6 所示。

表 6 高速公路特长隧道风险评价体系指标权重

目标	准则层	权重	指标层		权重
			交通量 $E_{11}$	路网因素 $E_1$	
高速公路 特长隧道 风险评价	路网因素 $E_1$	0.220	大车比例 $E_{12}$	0.244	0.293
			交通形式 $E_{13}$	0.463	0.244
			曲线半径 $E_{21}$	0.296	0.296
	隧道因素 $E_2$	0.308	纵坡坡度 $E_{22}$	0.237	0.237
			路面材质 $E_{23}$	0.191	0.191
			隧道通风 $E_{24}$	0.123	0.123
	驾驶人因素 $E_3$	0.192	隧道照明 $E_{25}$	0.153	0.153
			驾驶技术 $E_{31}$	0.460	0.460
			不安全行为 $E_{32}$	0.319	0.319
	车辆因素 $E_4$	0.113	安全意识 $E_{33}$	0.221	0.221
			车速 $E_{41}$	0.634	0.634
			车辆性能 $E_{42}$	0.366	0.366
	环境因素 $E_5$	0.106	内部环境 $E_{51}$	0.432	0.432
			外部环境 $E_{52}$	0.568	0.568
			交通管制水平 $E_{61}$	0.424	0.424
	管理因素 $E_6$	0.061	宣传教育 $E_{62}$	0.223	0.223
			隧道养护 $E_{63}$	0.353	0.353

## 4 终南山公路隧道运营风险预测

### 4.1 一级隧道运营风险的模糊综合评判

通过对专家打分情况的整理分析, 得到秦岭终南山隧道各指标隶属度如表 7 所示。

表7 秦岭终南山隧道评价指标隶属度

目标	准则层	指标层	模糊隶属度			
			优	良	中	差
路网 因素 $E_1$		交通量 $E_{11}$	0	0.2	0.4	0.4
		大车比例 $E_{12}$	0.2	0.5	0.2	0
		交通形式 $E_{13}$	0.7	0.3	0	0
隧道 因素 $E_2$		曲线半径 $E_{21}$	0.3	0.5	0.2	0
		纵坡坡度 $E_{22}$	0.4	0.5	0.1	0
		路面材质 $E_{23}$	0.3	0.4	0.3	0
高速 公路		隧道通风 $E_{24}$	0.5	0.4	0.1	0
		隧道照明 $E_{25}$	0.6	0.4	0	0
		驾驶技术 $E_{31}$	0.4	0.4	0.4	0
特长 隧道 风险 评价	驾驶人 因素 $E_3$	不安全行为 $E_{32}$	0.1	0.3	0.4	0.2
		安全意识 $E_{33}$	0	0.2	0.5	0.3
		车辆	车速 $E_{41}$	0.7	0.2	0.1
	因素 $E_4$	车辆性能 $E_{42}$	0.3	0.5	0.2	0
		环境	内部环境 $E_{51}$	0.2	0.6	0.2
	因素 $E_5$	外部环境 $E_{52}$	0.2	0.5	0.3	0
		管理	交通管制水平 $E_{61}$	0.4	0.4	0.4
	因素 $E_6$	宣传教育 $E_{62}$	0.3	0.6	0.1	0
		隧道养护 $E_{63}$	0.6	0.3	0.1	0

以路网因素为例, 交通量指标的隶属向量  $C_{11} = (0, 0.2, 0.4, 0.4)$ , 大车比例指标的隶属向量  $C_{12} = (0.2, 0.6, 0.2, 0)$ , 交通形式指标的隶属向量  $C_{13} = (0.7, 0.3, 0, 0)$ 。根据以上指标隶属向量组成的路网因素单因素评判矩阵为:

$$C_1 = (C_{11}, C_{12}, C_{13})^T = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \end{bmatrix}。 \quad (11)$$

则路网因素的模糊综合评判向量:

$$\begin{aligned} B_1 &= W_{11} \times C_1 = (0.293, 0.244, 0.463) \times \\ &\begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= (0.373, 0.344, 0.137, 0.146)。 \end{aligned} \quad (12)$$

按照同样的方法, 可得到其它各因素的模糊综合评判向量:  $B_2 = (0.394, 0.453, 0.153, 0)$ ,  $B_3 = (0.216, 0.324, 0.330, 0.130)$ ,  $B_4 = (0.554, 0.310, 0.136, 0)$ ,  $B_5 = (0.200, 0.543, 0.257, 0)$ ,  $B_6 = (0.448, 0.409, 0.143, 0)$ 。

#### 4.2 二级隧道运营风险的模糊综合评判

将得到的各因素评判向量  $B_i$  进行组合, 得到准则层的单因素评判矩阵为:

$$B = \begin{bmatrix} 0.373 & 0.344 & 0.137 & 0.146 \\ 0.394 & 0.453 & 0.153 & 0 \\ 0.216 & 0.324 & 0.330 & 0.130 \\ 0.554 & 0.310 & 0.136 & 0 \\ 0.200 & 0.543 & 0.257 & 0 \\ 0.448 & 0.409 & 0.143 & 0 \end{bmatrix}。 \quad (13)$$

则准则层的模糊综合评判向量:

$$C = W_U \times B = (0.356, 0.395, 0.192, 0.057)。 \quad (14)$$

最终综合评分值为:

$$v = C \times (4, 3, 2, 1)^T = 3.05。 \quad (15)$$

根据以上评判结果可知, 秦岭终南山高速公路隧道安全等级为安全, 说明该隧道运营风险较小, 在规范允许的范围内, 但是可以依据评判结果采取一些针对性的防控措施, 将安全隐患降到最低, 保障运营安全。

## 5 结论

本文基于模糊综合评判法对秦岭终南山高速公路隧道进行风险评估, 主要得出以下结论:

(1) 通过分析终南山隧道风险的影响因素, 量化风险指标, 采用数学中模糊综合评判的方法, 建立综合评判模型, 并对终南山隧道运营安全进行了评判, 评判结果为安全。

(2) 通过研究, 找到运营管理中的主要风险因素, 按照计算出的严重影响程度, 引进国际或者国内先进的理念, 通过技术创新, 加大安全生产投入, 预防和控制隧道各类风险点, 将安全隐患降到最低。

(3) 本文基于模糊评价模型, 能较为客观的反应实际, 但是在因素集和权重集建立的过程中, 不可避免带有一定的主观性, 值得继续进行深入的研究, 使得评价体系更加完善。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2020年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2021-07-07]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zghgs/20210517\\_3593412.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zghgs/20210517_3593412.html).
- [2] 潘正中, 邬洪波, 廖军洪, 等. 高速公路隧道运营安全风险管理技术研究[J]. 公路, 2017, 62(1): 141-146.
- [3] 吴森阳, 胡学兵. 公路隧道运营安全等级评估研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1): 363-370.
- [4] 郭延永, 刘攀, 吴瑶, 等. 山区高速公路隧道交通运行环境安全评价[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(7): 53-58.
- [5] 陈红, 周继彪, 王建军, 等. 公路隧道运行环境安全评价指标与方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(4): 54-61, 74.
- [6] 袁家伟. 四川省高速公路隧道交通事故特征分析及安全风险评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [7] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [8] 戴忧华, 郭忠印, 马艳, 等. 高速公路隧道运行环境安全评价指标[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 1171-1176.
- [9] 郝志虎. 高速公路特长隧道群安全综合评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [10] 吕跃进, 张维, 曾雪兰. 指数标度与1-9标度互不相容及其比较研究[J]. 工程数学学报, 2003, 20(8): 77-81.

(下转第234页)